



УДК 621.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ ГАЗА С ВПРЫСКОМ ВЛАГИ В ПРОТОЧНУЮ ЧАСТЬ КОМПРЕССОРА

EFFICIENCY RESEARCH OF GAS COMPRESSION PROCESS WITH MOISTURE INJECTION INTO THE COMPRESSOR FLOW

Иванов Максим Михайлович, магистрант каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: Maxonman@bk.ru, Тел.: +7(922)033-56-52

Гальперин Леонид Гдальевич, д-р. техн. наук, профессор каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: lhalp@k66.ru. Тел.: +7(902)263-66-36

Maxim M. Ivanov, Master student, Department «Teploenergetica i teplotechnica», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: Maxonman@bk.ru. Ph+7(922)033-56-52

Leonid G. Galperin, Doctor Sc., Prof., Department «Teploenergetica i teplotechnica», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: lhalp@k66.ru. Ph.: +7(902)263-66-36

Аннотация: В данной работе исследовано влияние количества впрыскиваемой монодисперсной системы капель в проточную часть компрессора на экономию работы сжатия. Приведены зависимости для полидисперсной системы капель.

Abstract: In this paper are investigated, how the number of the monodisperse droplets system, injected into the compressor flow, affects the saving of compression work. Dependencies for polydisperse droplet systems are shown.

Ключевые слова: впрыск воды; влажное сжатие; полидисперсная система капель; испарение капель жидкости

Key words: water injection; wet compression; polydisperse droplets system; evaporation of liquid droplets.

Одним из наиболее эффективных способов повышения экономичности компрессоров и газотурбинных установок (ГТУ) является впрыск воды в проточную часть турбомашин. Воздействие впрыска заключается в приближении процесса сжатия газа в компрессоре к изотермическому, а в ГТУ - дополнительно к снижению выбросов окислов азота. Разработка методов расчета процессов сжатия влажного газа приводится в ряде работ [1, 2, 3, 4].

В работе [1] проведен термодинамический анализ процесса политропного сжатия газа с учетом впрыска влаги, рассчитан среднеинтегральный показатель политропы сжатия и термодинамическая эффективность процесса в зависимости от количества впрыскиваемой влаги. В основе – предположение о полном испарении впрыскиваемой влаги к концу процесса сжатия. Выражения, определяющие величины показателя политропы «влажного» сжатия и экономию работы сжатия при этом приведены ниже:

$$\bar{n} = 1 + \frac{k-1}{\mu \cdot \left\{ \left(\frac{r}{T_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_2 \cdot C_V^*} - \frac{r}{T_2 \cdot C_V^*} - \frac{C}{C_{Vr}} \right\}}$$

$$\cdot \ln \left\{ \frac{1 + \frac{\mu \cdot (n_0 - 1)}{C_V^* \cdot (k-1)} \left[\left(\frac{r}{T_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_2} - \frac{r}{T_2} \right]}{1 + \frac{\mu \cdot (n_0 - 1) \cdot C}{(k-1) \cdot C_{Vr}}} \right\} \quad (1)$$

$$\Theta = 1 - \frac{\sigma}{\omega_1 \cdot \sigma_0} \cdot \frac{(\beta \cdot \varepsilon)^{\frac{\omega_1}{\sigma}} - 1}{\frac{1}{\varepsilon^{\sigma_0 - 1}}} \cdot A; \quad (2)$$

$$A = \frac{1 + 1.61 \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot (1 + \bar{\lambda} \cdot \bar{\mu})}{1 + 1.61 \cdot \mu_0} \quad (3)$$

В этих выражениях ε – степень сжатия газа; μ, μ_0 – количество впрыскиваемой и исходной влаги в газе соответственно, кг влаги на 1 кг сухого газа; R_2 – газовая постоянная образовавшейся после полного испарения впрыснутой влаги парогазовой смеси;

$$\bar{\mu} = \mu / \mu_0; \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{0.622}{\mu_0} + \bar{\mu} + 1; \quad (5)$$

$$\beta = 1 - \frac{\mu}{\Delta} \quad (6)$$

$$\alpha = \beta \cdot (1 + \bar{\mu}); \quad (7)$$

$$C_V^* = C_{Vr} + \mu \cdot C_{Vn} \quad (8)$$

$C, C_{Vr}, C_{Vn}, C_{Vv}^*$ – теплоемкости впрыскиваемой жидкости, газа, пара и смеси соответственно.

$$\sigma = \frac{n}{n-1}; \sigma_0 = \frac{n_0}{n_0-1}; \quad (9)$$

$$\omega = \frac{\lg(\alpha\varepsilon)}{\lg(\beta\varepsilon)}; \omega_1 = \frac{\lg(\varepsilon)}{\lg(\beta\varepsilon)}; \quad (10)$$

n_0, n – показатели политропы «сухого» и влажного сжатия соответственно; индексы «1» и «2» относятся к состояниям в начале и конце процесса сжатия.

A – коэффициент увеличения работы сжатия газа с диспергированной влагой в сравнении со сжатием исходного газа. Коэффициент λ зависит от кинетики испарения капель влаги в период сжатия. Растущие при этом температура и давление оказывают противоположное влияние на скорость испарения. Можно предположить, что $0,5 < \lambda < 1$. Исследование кинетики испарения полидисперсной системы капель влаги рассматривается дополнительно. В первом приближении в оценочных расчетах значение коэффициента λ принимается равным 0,7.

Из общих соображений следует, что с одной стороны увеличение количества впрыскиваемой влаги ведет к снижению температуры конца сжатия и следовательно к приближению процесса сжатия к идеальному изотермическому. Однако с другой стороны увеличивается количество образующегося пара в смеси, так что часть работы сжатия затрачивается на повышение давления пара. Следовательно, существует оптимальное количество впрыскиваемой влаги, расчет которого является целью данной работы.

Для проведения расчетов была разработана программа, в результате реализации которой исследовано влияние количества впрыскиваемой в проточную часть компрессора влаги на экономию работы сжатия и температуру окончания в зависимости от степени сжатия и начальных параметров состояния газа. Основные результаты расчетов иллюстрируются графиком на рис. 1. который отражает зависимость экономии работы сжатия от количества впрыскиваемой влаги при разных значениях показателя политропы процесса «сухого» сжатия. Параметры начала сжатия - $P_1 = 0.1$ МПа, $T_1 = 20^\circ\text{C}$; степень сжатия $\varepsilon = 2.83$. В сравнении со сжатием сухого газа, при сжатии влажного газа наблюдается уменьшение значения показателя политропы и увеличение экономичности в начальном периоде. Согласно результатам расчета экономическая эффективность впрыска в первую ступень сжатия составила ~3%- 5% Количество впрыскиваемой влаги при этом порядка 10 г на кг сухого газа.

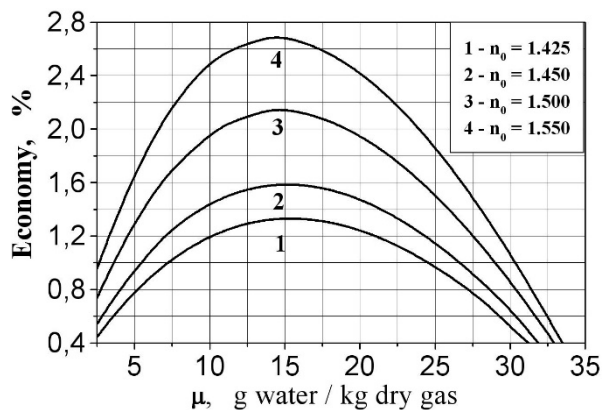


Рис. 1. Зависимость экономии работы сжатия от количества впрыскиваемой влаги

Следует отметить, что в расчетах не учитывается полидисперсность впрыскиваемой системы капель, которая не может не сказываться на результатах. Используя развитый в [3, 4] подход, анализ влияния полидисперсности смеси капель влаги можно провести из рассмотрения уравнения для функции распределения капель в смеси по размерам, дополненного выражением, определяющим скорость процесса испарения. Распределение по размерам в начальный момент описывается функцией распределения, характерной для смесей, образованных распылением из форсунок:

$$f_0(r) = A \cdot r^b \cdot \exp(-c \cdot r); 0 \leq r \leq \infty; \quad (11)$$

Коэффициент b зависит от конструктивных параметров распыляющего устройства и в среднем $b=2.33$. Принимаем в дальнейшем $b=2$. Функция $f_0(r)$ нормирована на единицу

$$\int_0^\infty f_0(r) dr = \frac{2A}{|c^3|} = 1 \quad (12)$$

При движении капель в потоке газа происходит их постепенное испарение, так что распределение по размерам эволюционирует

$$f_0(r) \rightarrow f(r, t) \quad (13)$$

Эволюция функции распределения описывается уравнением непрерывности(14)

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} [W(r, t) \cdot f(r, t)] = 0 \quad (14)$$

$$W \equiv \frac{dr}{dt} \quad (15)$$

$$\int_0^\infty f(r, t) dr \neq 1 \quad (16)$$

Объем оставшейся влаги определяется выражением(17)

$$y(t) = \frac{N(t) \cdot \langle r^3 \rangle}{N_0 \cdot \langle r_0^3 \rangle} = \int_0^\infty \frac{r^3}{\langle r_0^3 \rangle} \cdot f(r, t) dr \quad (17)$$

$$\langle r_0^3 \rangle = \int_0^\infty r^3 \cdot f_0(r) dr = \frac{120a}{c^6} = \frac{30}{A} \quad (18)$$

Текущий размер частицы можно определить из формулы Максвелла(19)

$$r^2 = r_0^2 - \frac{2D}{\rho} \cdot (c_0 - c_\infty) \cdot t = r_0^2 - \frac{2D\mu}{\rho R_0 T} \cdot (p_0 - p_\infty) \cdot t \quad (19)$$

Оценка масштаба времени испарения в диффузионном режиме(20)

$$[t] \sim \frac{[r_0^2]}{[D]} = \frac{(10^{-6} - 10^{-8})}{(0.2 - 0.25) \cdot 10^{-4}} = \frac{1}{(4 - 5) \cdot (10^{-2} - 10^{-4})} \text{с} \quad (20)$$

D – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе, $[m^2/c]$.
 r_0 - радиус капли.

Поток массы пара с поверхности частицы с учетом продолжительности полного испарения, существенно превышающей масштаб времени диффузионного процесса (r_0^2/D), можно оценить, аппроксимируя частицу сферической формы мгновенным сферическим источником массы.

Поле концентраций водяного пара в окрестности капли ($r_0 \leq r \leq \infty$) [5]

$$c(r, t) - c_\infty = (c_0 - c_\infty) \cdot \frac{m}{\rho \cdot (4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(r-r_0)^2}{4Dt} \right] - \exp \left[-\frac{(r+r_0)^2}{4Dt} \right] \right\} \quad (21)$$

Кинетика испарения капли влаги также рассматривается в литературе [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С.Л. Магачев, Г.П. Ясников, Ю.В.Кузнецов, Л.Г. Гальперин. Термодинамические параметры при сжатии влажного газа. / В Сборнике «Надежность и экономичность компрессорных машин». Изд. УПИ, Свердловск, 1971. С. 5-16.
- 2.Н.М. Цирельман, Р.Р.Мустафин. Моделирование процессов теплообмена при испарении капель воды потоке воздуха в ВУ ГТУ. Вестник УГАТУ, т.13, №1 (34), Уфа, 2009. С. 20-25
3. Ю.А. Бувечич. О кинетике массообмена полидисперсной системы частиц с окружающей средой. ПМТФ, №1, 1966. С. 50-57.
4. Ю.А. Бувечич, Г.П. Ясников. Кинетика растворения полидисперсной системы частиц. ТОХТ, т. XVI, №5, 1982. С.597-603.
- 5.Г.Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. М., Наука, 1964.